

Conference Paper, Published Version

**Halleux, Lucien**

**Geophysik im Wasser- und Tiefbau**

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105232>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Halleux, Lucien (2017): Geophysik im Wasser- und Tiefbau. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Bohrungen und Baugrund. Herausforderungen bei der Ausführung in der horizontalen und vertikalen Bohrtechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 53-60.

**Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## Geophysik im Wasser- und Tiefbau

Prof. Dr. Ir. Lucien Halleux  
G-Tec SA, 8 rue des Alouettes, B 4041 Milmort (Lüttich), Belgien  
+32 475 275806 [l.halleux@g-tec.eu](mailto:l.halleux@g-tec.eu) [www.g-tec.eu](http://www.g-tec.eu)

### Zusammenfassung

Geophysikalische Verfahren werden benutzt, um auf nicht destruktive Weise ein Bild des Untergrundes zu erzeugen. Es gibt eine große Vielfalt an geophysikalischen Verfahren, die auf Land, in Bohrungen oder unter Wasser eingesetzt werden können. Einige Anwendungen im Wasser- und Tiefbau werden kurz beschrieben: geologischer oder geotechnischer Hintergrund, Prinzip des Verfahrens, Interpretation der Ergebnisse. Die geologischen, geotechnischen, und geophysikalischen Erkundungsmethoden haben alle wichtige Einschränkungen und ergänzen sich in einem gewissen Maße. Bei der Planung von Bodenerkundungskampagnen müssen die richtigen Verfahren ausgewählt werden um die Fragestellung auf zweckmäßige Weise zu beantworten. Die wachsende Bedeutung der Qualität in der Geophysik wird betont. Insbesondere müssen Möglichkeiten und Einschränkungen für jede Anwendung deutlich definiert werden.

### 1 Einführung

Die geophysikalischen Verfahren dienen dazu ein Bild des Untergrundes zu erzeugen. Die Akquisition und die Bearbeitung der Daten ruht auf physikalischen Grundlagen, die Interpretation muss aber auch die lokale Bodenbeschaffenheit berücksichtigen. Die Säulen der Geophysik sind dessen die Physik, die Geologie bzw. Geotechnik, die Elektronik (Gerätebau) und die Datenverarbeitung.

Die geophysikalische Erkundung des Untergrundes ist eine wichtige Branche der Industrie, mit einem globalen Jahresumsatz von ca. 10-15 Milliarden €. Der wichtigste Anwendungsbereich ist die Öl- und Gas Exploration mit mehr als 90% der Marktanteile. Andere Anwendungsgebiete sind Rohstoffe, Grundwasser- und Umwelterkundung, Geothermie, Bauwesen, Archäologie usw.

Anstatt die verschiedenen Verfahren einzeln zu beschreiben werden im Rahmen dieses Vortrages Anwendungsbeispiele kurz vorgestellt. Anhand dieser Beispiele können die Grundlagen, Ausführungsweisen, Möglichkeiten und Einschränkungen praktisch erläutert werden.

### 2 Erkundung von Unterwasserhindernissen in Unter- und Außenelbe

Im Rahmen der Fahrrinnenanpassung der Elbe sind zwischen Cuxhaven und Hamburg Baggerarbeiten geplant. Um Beschädigungen an der Sauganlage der Laderaumbagger zu vermeiden ist es wichtig Hindernisse wie z.B. Wracks, Ankers oder Ladungsreste vor Beginn der Baggerarbeiten zu bergen. Das Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven hat im Jahre 2011 eine geophysikalische Erkundung von 31 Unterwasserhindernissen beauftragt mit dem Zweck die Hindernisse genauer zu beschreiben und zu kontrollieren ob sie auch tatsächlich die Ausbaubaggerungen beeinträchtigen würden.

Für jedes Hindernis wurde ein 300 x 300 Meter großes Suchgebiet festgelegt mit, als Zentrum die vermutliche

Position des Objektes. Innerhalb des Polygons wurden Fächerecholot, Side Scan Sonar, seismische und magnetische Messungen entlang eines dichten Messrasters aufgenommen, bearbeitet und interpretiert. Als Vorbild werden die Messungen und Interpretationen auf einem besonders interessanten Wrack beschrieben. Es handelt sich um ein ehemaliges Werkstattschiff, das im Jahr 1944 durch Bombentreffer gesunken ist. Wegen späterer Sprengungs- und Teilbergungsarbeiten ist das Wrack stark zertrümmert. Taucherbeobachtungen hatten schon gezeigt dass das größte Teil des Wracks unterhalb der Gewässersohle liegt, und dass nur einige Teile wie z.B. Spanten lokal aus dem Grund ragen.

#### 2.1 Fächerecholot und Side Scan Sonar Messungen

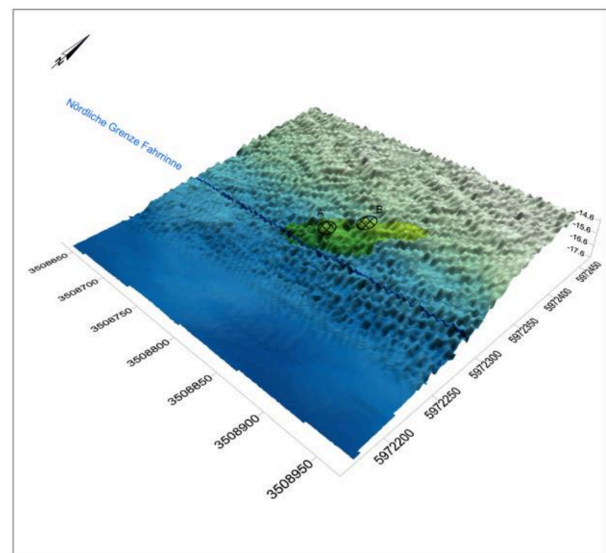


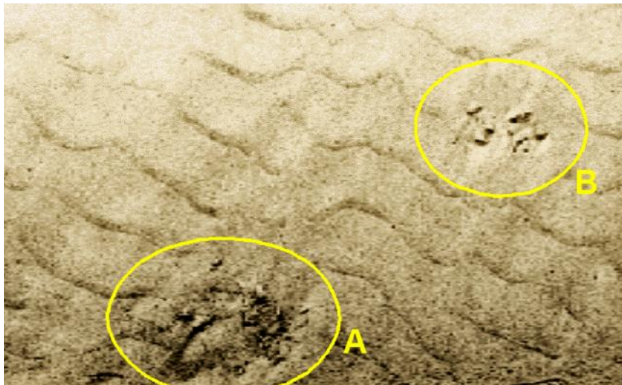
Bild 1: 3D Ansicht des Suchgebietes.

Das Fächerecholot ist ein auf die Reflektion von Ultraschall basiertes Sonarverfahren. In diesem Falle wurde eine Frequenz von 400 kHz benutzt. Die Messung ergibt eine sehr detaillierte bathymetrische Karte. Auf dem Bild 1 ist eine 3D Ansicht des Suchgebietes dargestellt.



Das Suchgebiet befindet sich an der nördlichen Grenze der heutigen Fahrrinne. Innerhalb der Fahrrinne ist die Bodenmorphologie regelmäßig als Folge der Unterhaltungsbaggerung. Außerhalb der Fahrrinne sind Riffeln deutlich sichtbar mit einer Höhe von 0,5 bis 1m. Die Position des Wracks unterhalb der Gewässersohle ist aus den anderen Messungen abgeleitet (siehe weiter) und auf Bild 1 gelb markiert.

Das Side Scan Sonar basiert ebenfalls auf der Reflektion eines Ultraschallsignals, ergibt aber ein Bild der Gewässersohle anstatt eine Karte. Der Unterschied gegenüber dem Fächerecholot ist vergleichbar mit dem Unterschied zwischen einem Luftbild und einer topographischen Vermessung auf Land. Der Vorteil eines solchen Bildes gegenüber dem Fächerecholot ist die höhere Auflösung.

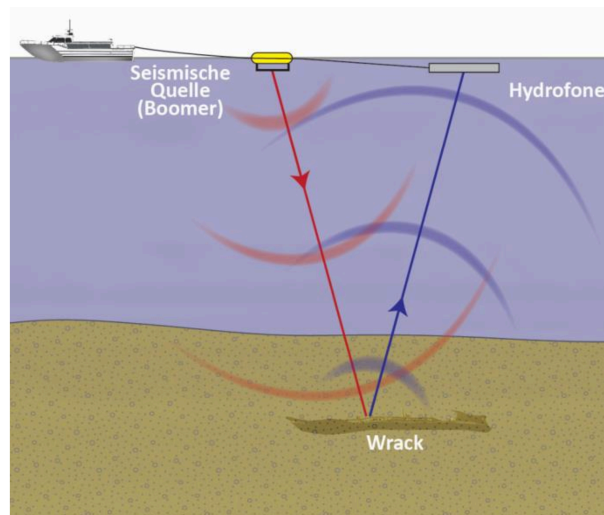


**Bild 2:** Detailansicht der Side Scan Sonar Aufnahme

Auf dem Bild 2 ist eine Detailansicht der Side Scan Aufnahme dargestellt. Die Riffelmorphologie der Gewässersohle ist deutlich erkennbar, sowie 2 Zonen (A und B) wo Trümmer aus dem Grund ragen. Das Bild ist georeferenziert, die Position der Zonen kann also auf der bathymetrischen Karte (Bild 1) genau eingetragen werden.

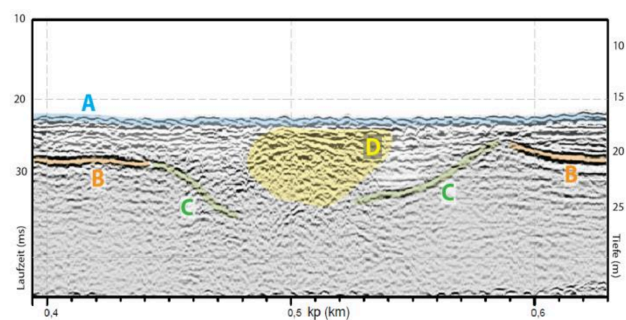
## 2.2 Seismik

Mit den Sonar Verfahren ist wegen der hohen Frequenz kein Eindringen im Untergrund möglich. Für die flache marine Seismik werden wesentlich niedrigere Frequenzen benutzt, im Bereich 1 bis 15 kHz. Je niedriger die Frequenz, umso niedriger die Dämpfung und umso größer die Eindringungstiefe. Niedrigere Frequenzen bedeuten aber auch eine niedrigere Auflösung. Das Prinzip des Verfahrens ist auf Bild 3 erläutert. Eine seismische Quelle erzeugt ein akustisches Signal. In diesem Fall wurde eine elektrodynamische Quelle des Typs „Boomer“ eingesetzt. Das Signal ist breitbandig (2 bis 4 kHz) und gut geeignet für Bodenerkundung auf Tiefen bis 20-40 m.



**Bild3:** Prinzip der flachen marine Seismik

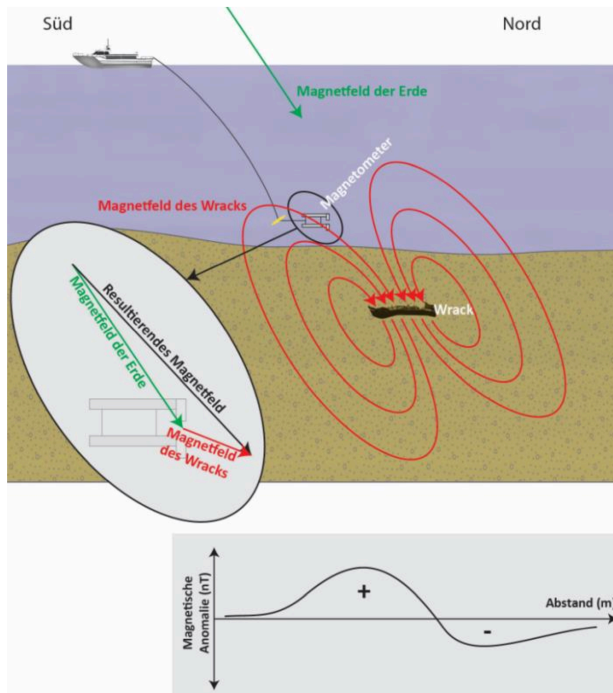
Das Signal wird auf der Gewässersohle, auf Schichten oder, wie auf Bild 3 gezeigt, auf massiven Hindernissen reflektiert. Die Reflektionen werden durch ein Hydrophon aufgenommen. Das Suchgebiet wurde flächendeckend erkundet durch dicht aneinander liegende Profile. Bild 4 zeigt einen interpretierten Ausschnitt eines Profils oberhalb des Wracks. Reflektor A entspricht der Gewässersohle, auf einer Tiefe von 16-17 m. Reflektor B ist eine Torfschicht. In der Zone D sind zahlreiche und unregelmäßige Reflektoren sichtbar. Sie entsprechen der Oberkante des Wracks und Wrackstücken. Reflektor C wird interpretiert als eine ehemalige Auskolkung. Die Reflektionen auf dem Wrack zeigen die Tiefenlage der Oberkante des Hindernisses, geben aber keine genaue Informationen über die vertikale Ausdehnung. Reflektor C deutet an, dass die Unterkante des Wracks sich auf einer Tiefe von ca. 25 m befindet. Die Auflösung beträgt ca. 5 m. Details der Struktur sind deshalb nicht zu erkennen. Die Sedimentüberdeckung kann bestimmt werden, und daraus wird berechnet, wie viel Sediment vor der Bergung zu entfernen ist.



**Bild 4:** Seismisches Profil überhalb eines Wracks

## 2.3 Magnetometrie

Im Vergleich zur Seismik ist die Magnetometrie ein passives Verfahren. Es wird kein Signal erzeugt, die Apparatur misst einfach das natürliche magnetische Feld der Erde, wie auf dem Bild 5 in grün dargestellt. Im Bereich Hamburg – Cuxhaven beträgt das Feld ca. 49.520 nT (nanoTesla). Ein ferromagnetisches Objekt (d.h. ein Objekt, was Eisen oder Stahl enthält) verursacht ein zusätzliches magnetisches Feld (rot auf der Abbildung).



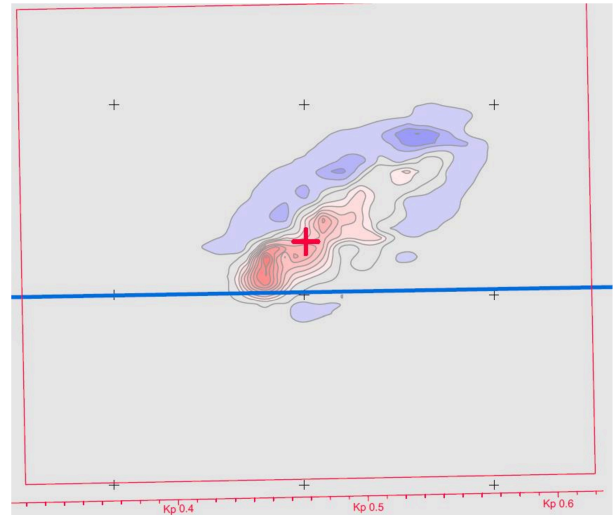
**Bild 5:** Prinzip der Magnetometrie

In der Umgebung eines solchen Objektes misst das Magnetometer die Summe des normalen Feldes der Erde (grün) und des Feldes des Objektes (rot). Es ergibt sich eine Abweichung (Anomalie) verglichen mit dem normalen Feld. Ein magnetisches Objekt hat immer einen Nord- und einen Südpol. Es handelt sich also immer um einen Dipol, deshalb besteht die Anomalie aus einem positiven und einem negativen Teil, wie auf dem skizzierten Messprofil (Bild 5 unterer Teil) dargestellt.

Die Ergebnisse der magnetischen Messung im Suchgebiet dieses Objektes sind auf Bild 6 dargestellt. Es handelt sich um die Karte des magnetischen Gradienten. Eine ausgebreitete magnetische Anomalie ist deutlich sichtbar. Die Polarität der Anomalie ist normal, mit einem stark positiven Teil (rot) auf der südlichen Seite und einer etwas schwächeren negativen Anomalie (blau) auf der nördlichen Seite, rund um den positiven Teil. Die Tatsache, dass innerhalb der roten und blauen Zonen deutliche lokale Variationen bestehen, ist ein Hinweis auf ein unregelmäßiges Objekt, wie man es von einem Wrack erwarten kann. Diese Variationen können

auf Teile deuten oder auf ein insgesamt gebrochenes Wrack.

Bei Anomalien mit einer großen Ausdehnung, wie sie hier vorliegt, befindet (befinden) sich das (die) Objekt(e) normalerweise innerhalb des positiven Teils. Die positive Anomalie streckt sich in Richtung SW-NO aus. Sie ist 125 m lang. Die Breite variiert von 20 m bis 40 m.



**Bild 6:** Magnetische Karte

Leider sind die genaue Form und die Amplitude der Anomalie von vielen Parametern abhängig: Abstand zwischen Magnetometer und Objekt, Form des Objektes, magnetische Eigenschaften des Objektes. Diese Parameter sind objektabhängig und also unbekannt. Deshalb bleiben die Aussagen über Form, Tiefenlage und Masse ungenau. Dagegen kann die Position ziemlich genau bestimmt werden, auch im Fall dass das Objekt unterhalb der Gewässersohle liegt.

## 3 Karst und Hohlraumdetektion

Die geophysikalischen Verfahren spielen eine wichtige Rolle für die Detektion von Hohlräumen und Verkarstungen. Typische Anwendungen sind die Trassenerkundung (Eisenbahnen, Straßen, Leitungen, Kabel), der Tunnelbau und der Tiefbau. Hohlräume können natürlichen Ursprungs sein (Verkarstung im Kalkstein oder Sulfatgestein) oder anthropogen (z.B. ehemaliger Grubenbau). Die Anwesenheit von unerwarteten Hohlräumen hat oft gravierende Folgen während den Bauarbeiten oder im späteren Betrieb einer Infrastruktur.

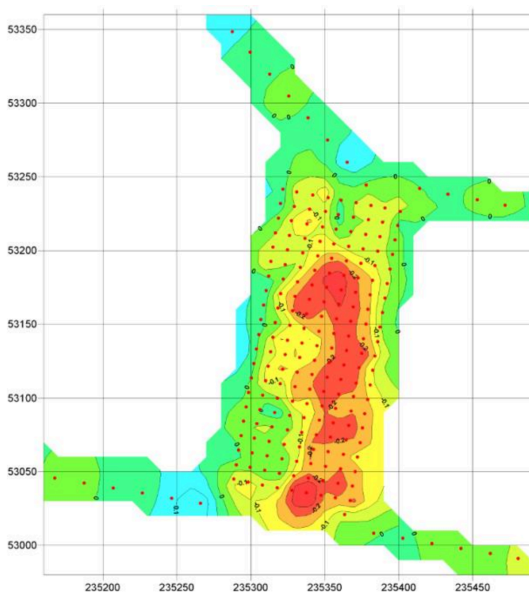
Die konventionellen geotechnischen Erkundungsverfahren geben nur eine sehr lokale Information. Bei Hohlraumerkundung ist dies eine bedeutende Einschränkung. Moderne Hohlraumerkundung basiert deshalb auf einer Kombination von geophysikalischen Verfahren für die flächendeckende Erkundung und Bohrungen mit Bohrlochmessungen zur Charakterisierung der Hohlräume. Es besteht eine große Vielfalt an



geophysikalischen Verfahren, die eingesetzt werden können. Die wichtigsten sind die Gravimetrie, das Georadar, die Geoelektrik, die Seismik und viele Bohrlochmessungsverfahren. Jedes Verfahren hat seine eigenen Möglichkeiten und Einschränkungen, die abhängig sind von der lokalen Geologie und von den Messbedingungen. Eine wichtige Rolle spielen z.B. der Grundwasserspiegel oder die Füllung der möglichen Hohlräume. Die Auswahl der richtigen Erkundungsverfahren sowohl aus geophysikalischer als aus geologisch/geotechnischer Hinsicht spielt eine Hauptrolle für den Erfolg einer Kampagne.

### 3.1 Ehemaliger Phosphatabbau

Nördlich der Stadt Lüttich musste eine Industriehalle gebaut werden. Der Untergrund besteht aus ca. 8 m Löss, 1 m Flinsteinkonglomerat und Kreide. Der Grundwasserspiegel liegt tief. In der Verwitterungszone der Kreide befindet sich eine Phosphatschicht die in der Vergangenheit örtlich abgebaut wurde. Die genaue Position der ehemaligen Gruben und Hohlräume ist oft unbekannt. Meistens wurde ein unregelmäßiger Kamm- und Pfeilerabbau betrieben. Wegen der starken Flinsteinschicht an der Firste stürzten die Hohlräume meistens nicht ein, zumindest nicht vollkommen.



**Bild 7:** Bouguer Abweichung in  $\mu\text{m/s}^2$

Die Gravimetrie basiert auf der Messung der Schwerkraft. Hohlräume verursachen eine negative Abweichung (Verminderung) der Schwerkraft wegen dem lokalen Massendefizit. Diese Abweichung ist sehr gering und benötigt besondere Messungs- und Korrekturprozeduren um überhaupt nachweisbar zu sein. Die Ergebnisse haben eine relative Genauigkeit in der Größenordnung  $10^{-9}$  (Mikrogravimetrie).

Auf dem Bild 7 ist eine Karte der Schwerkraftanomalie (Bouguer Anomalie) dargestellt. Die Messungen wur-

den entlang einem 10 m Raster ausgeführt (rote Punkte). Eine negative Abweichung (gelb, orange, rot) ist deutlich sichtbar mit einer Ausdehnung von ca. 250 m in N-S Richtung und ca. 100 m in O-W Richtung. Die maximale Abweichung beträgt  $0,2 \mu\text{m/s}^2$ . Durch Modellierung ist es möglich, die Mächtigkeit der abgebauten Schicht zu schätzen. Auf Grund der Karte können Bohrungen zieltreffend geplant werden. In diesen Bohrungen können Kameraspektionen, Lasermessungen (oberhalb des Grundwasserspiegels) oder Sonarmessungen (unterhalb des GWSp) durchgeführt werden um die Geometrie der Hohlräume genauer zu erkunden.

Negative Abweichungen der Schwerkraft deuten nicht immer auf Hohlräume. Es kann sich auch um Mächtigkeitsvariationen der Bodenschicht oder andere natürliche Ereignisse handeln. Bei der Interpretation ist es wichtig, die lokale Geologie zu berücksichtigen und deutlich auf Möglichkeiten und Einschränkungen des Verfahrens hinzuweisen.

### 3.2 Paläoverkarstung im Kalkstein

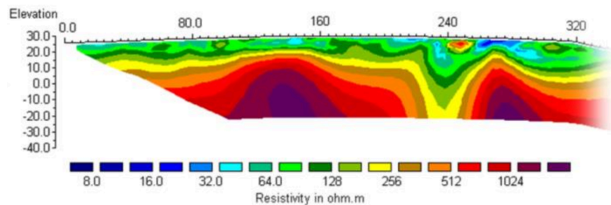
Im westeuropäischen Raum sind (waren) sowohl die Kohlenflöze des oberen Karbons als die Kalksteinschichten des unteren Karbons von besonderer ökonomischer Relevanz. Sie können aber auch schwierige geotechnische Probleme verursachen, einerseits wegen dem Kohlenabbau, andererseits wegen Verkarstungen. Die Oberkante des Kalksteins ist in der Hinsicht sehr bekannt, da großräumige Verkarstungen, die sich vor Ablagerungen des oberen Karbons gebildet haben, bis heute mehr oder weniger aktiv geblieben sind. Typische hiermit verbundene Probleme sind z.B. Firstenstabilität und Wasserhaltung im Tunnelbau, Tragfähigkeit von Pfählen, Stabilität von Steinbruchwänden.



**Bild 8:** Verkarstung im Kalkstein des unteren Karbons

Bild 8 zeigt eine solche Verkarstung in einem ehemaligen Steinbruch. Die Verkarstung ist beinahe vertikal, hat einen Durchmesser von ca. 10 m und ist gefüllt mit

tertiärem Sand und quartärem Lehm. Solche großen, mit Sediment gefüllten Verkarstungen können meistens von der Oberfläche aus mit Geoelektrik geortet werden. Die Geoelektrik basiert auf der Injektion eines Gleichstroms und dem Messen des resultierenden Potentialfeldes an der Erdoberfläche.



**Bild 9:** Geoelektrischer Schnitt im Kalkstein. Vertikaler und horizontaler Maßstab in m

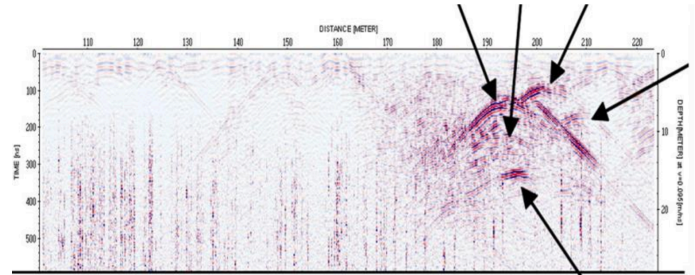
Auf Bild 9 ist ein vertikaler geoelektrischer Schnitt dargestellt. Der Schnitt ist 320 m lang und die Eindringungstiefe beträgt ca. 40 m. Der Boden besteht aus ca. 10 m Lehm mit einer Resistivität von 40 bis 100 ohm.m (blau bis grün). Der unterliegende feste Kalkstein hat eine wesentlich höhere Resistivität (500 ohm.m und mehr, rot). Auf der Position 240 m ist eine Vertiefung des Kalksteins deutlich sichtbar, die als eine Verkarstung interpretiert wird. Eine Bohrung auf dieser Position hat die Interpretation befestigt. Die Verkarstung ist mit tertiärem Sand gefüllt.

### 3.3 Karsterkundung im Tunnelbau

Für den Tunnelbau stellen offene Verkarstungen einen erheblichen Risikofaktor dar. Insbesondere in tiefen Tunneln kann der hohe Druck zu massiven Wasserzuflüssen führen. Gerade in diesem Fall sind die Erkundungsmöglichkeiten von der Oberfläche aus sehr eingeschränkt wegen der Mächtigkeit der Überlagerungsschichten. Mit Hilfe von horizontalen Bohrungen von der Ortsbrust aus kann das Vorfeld sehr genau erkundet werden; die Bohrung allein kann aber keine Garantie geben, dass der gesamte Querschnitt hohlraumfrei ist. Geophysikalische Bohrlochmessungen, insbesondere das Bohrlochradar sind die ideale Ergänzung zu solchen Bohrungen. Eine Antenne strahlt elektromagnetische Impulse aus in einem Frequenzbereich von 50 MHz bis 250 MHz. Die Welle breitet sich rund um das Bohrloch aus und wird von Diskontinuitäten im Fels reflektiert. Hohlräume verursachen sehr deutliche Reflektionen wegen dem hohen dielektrischen Kontrast zwischen Fels und Wasser. Die Reflektionen werden aufgenommen, verarbeitet und gespeichert. Die Entfernung zwischen der Bohrung und der Diskontinuität wird aus der Laufzeit berechnet.

Auf Bild 10 sind die Ergebnisse einer Bohrlochradarmessung in einer horizontalen Bohrung dargestellt. Die Bohrung und die Messungen wurden während dem Vortrieb eines Tunnels durch Kalkstein ausgeführt. Die horizontale Achse entspricht dem Abstand zur Ortsbrust, die vertikale Achse entspricht der Laufzeit (links) und den Abstand zur Bohrung (rechts). Bis auf

einem Abstand von 190 m werden keine bedeutenden Reflektoren beobachtet.



**Bild 10:** Bohrlochradarmessung in einem horizontalen Bohrloch (Radargramm)

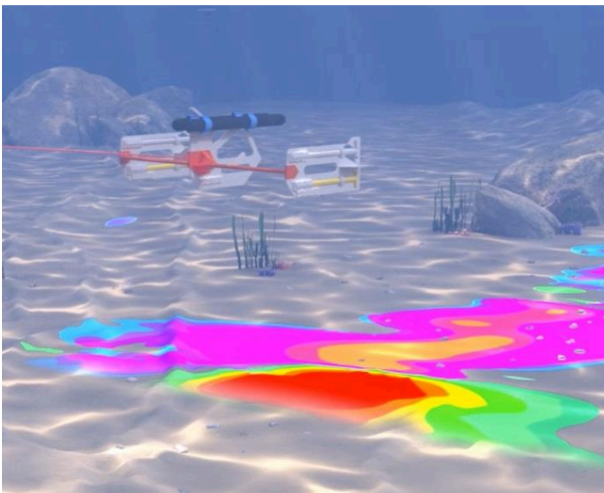
Im Bereich von 190 bis 200 m sind mehrere „Punktreflektoren“ deutlich sichtbar. Die Benennung „Punktreflektor“ bezeichnet einen Reflektor, der keine laterale Ausdehnung hat, z.B. ein lokaler Hohlraum, im Gegensatz zum „Planarreflektor“ wie z.B. die Schichtung. Auf einer Radar-Aufnahme erscheint ein Punktreflektor als eine Hyperbel. Der Reflektor befindet sich genau am Scheitel der Hyperbel. Die wichtigsten Punktreflektoren befinden sich auf Abständen von 5, 7 und 16 m zum Bohrloch. Sie werden interpretiert als mögliche Hohlräume. Zusätzliche Bohrungen sind erforderlich, um diese Reflektoren genau zu charakterisieren und ggfs. Injektionen durchzuführen.

### 4 Offshore Kampfmittelerkundung

Die Entwicklung der Offshore Windenergie hat neue Herausforderungen im Bereich Erkundung, Freilegung und Räumung von Kampfmitteln gebracht. Einerseits müssen sehr große Flächen und Kabeltrassen schnell und effizient untersucht werden, andererseits sind die örtlichen Bedingungen wesentlich schwieriger als auf Land (Wellengang, Wind, Strömung ...). Für die Erkundung wird systematisch die Magnetometrie, bzw. magnetische Gradiometrie benutzt. Die meisten Kampfmittel enthalten Eisen oder Stahl und verursachen deshalb eine magnetische Anomalie (siehe Bild 5). Im Vergleich zu der Detektion von größeren Unterwasserhindernissen haben die Anomalien eine wesentlich schwächere Amplitude und eine kleinere Ausbreitung. Es müssen deshalb sehr empfindliche Magnetometer benutzt werden und diese müssen dicht über dem Seeboden geschleppt werden. Das Einsetzen von einem präzisen Unterwasserpositionierung System und entsprechendem Navigationssoftware ist unentbehrlich (siehe Bild 11).

Hochauflösende Side Scan Sonar und Video Erkundung sind nützlich für Objekte, die sich auf dem Seeboden befinden. In der Praxis kommt es aber oft vor, dass alte Kampfmittel mit Seegras bewachsen sind, wodurch es schwierig ist, das Objekt zu sehen.





**Bild 11:** Hochauflösende magnetische Gradiometrie für offshore Kampfmittelerkundung

Einige Kampfmittel enthalten wenig oder kein Eisen, (z.B. LMB Minen) und können deshalb kaum mit der Magnetometrie detektiert werden. Hochauflösende Seismik kann eine Alternative sein, man muss sich aber darüber bewusst sein, dass kleine Objekte mit Seismik nur beschränkt detektierbar sind.

Die große Mehrheit der detektierten Objekte sind keine Kampfmittel, sondern allerlei Eisen- oder Stahlgegenstände sowie Schrott, Anker, Stücke von Kabeln oder Ketten, usw. Deshalb muss auch die Freilegung der Objekte auf sichere und effiziente Weise erfolgen. Die Kombination eines Dynamisch Positioniertem (DP) Bohrschiffes (siehe Bild 12), ausgerüstet mit ROV (remotely operated vehicle, Bild 13), Airlift (Bild 14), Greifer, Magnetometer, Akustik- und Videotechnik erlaubt eine schnelle Überprüfung der Treffer bis auf Wassertiefen von 100 m oder mehr.

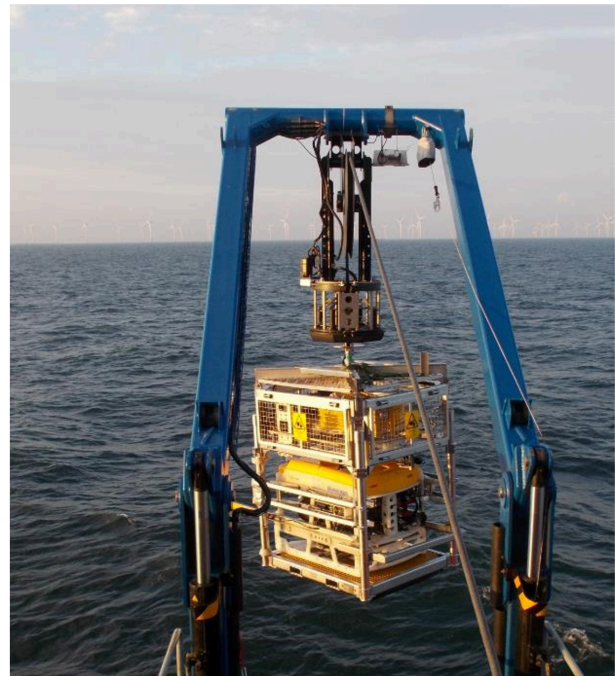


**Bild 12:** DP Bohrschiff für Einsatz in Wassertiefen von 20 bis 150 m

Der Vorteil eines DP Schiffes gegenüber Pontons oder einfachen Schiffen ist, dass weder Anker noch Stelzen in Kontakt mit dem Seeboden gebracht werden, wodurch der Einsatz wesentlich schneller und sicherer verläuft.

Die freigespülten Objekte werden mit Hilfe von akustischen und Video-Kameras von Kampfmittel-Spezialisten (EOD's) untersucht. Im Falle Abfall wer-

den die Stahlgegenstände mit Hilfe von Greifern und ROV auf dem Schiffsdeck hochgezogen und in einem Container gesammelt. Im Falle Kampfmittel wird die Entsorgung entsprechend der lokalen Gesetzgebung unternommen.



**Bild 13:** Einsatzbereites ROV



**Bild 14:** Einsatzbereites Airlift

## 5 Schlussfolgerung

Bodenerkundung für Wasser- und Tiefbau ist ein komplexes Thema wegen der Vielfalt der geologischen oder geotechnischen Bedingungen einerseits, und der Erkundungsverfahren andererseits. Die Risiken, die verbunden sind mit unzureichender oder ungeeigneter Bodenin-



formation können gravierende Folgen haben in Hinsicht auf Sicherheit, Kosten und Funktionsfähigkeit einer Infrastruktur. Auf internationaler Ebene entwickelt sich die Bodenerkundung mehr und mehr als ein selbständiges Fach, in dem die Geologie, die Geotechnik und die Geophysik gemeinsam betrachtet werden. Auf diese Weise können die Erkundungskampagnen optimiert werden, indem die richtigen Verfahren für den richtigen Zweck und in der richtigen Abfolge eingesetzt werden. Die Qualität im Bereich der Geophysik beschränkt sich nicht auf die Messungen im engen Sinne. Die Bodenerkundung für ein bestimmtes Projekt ist ein industrieller Prozess, bestehend aus Entwurf einer Kampagne, Auswahl der geeigneten Verfahren, Durchführung der Feldarbeiten, Datenverarbeitung, Integration und Interpretation aller Daten. Jeder dieser Schritte muss qualitativ hochwertig und auf professionelle Weise ausgeführt werden. Zusammen mit der Interpretation müssen wichtige Einschränkungen und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse besprochen werden.

#### **Dankwort**

Das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Cuxhaven hat uns freundlicherweise die Nutzung der geophysikalischen Ergebnisse auf der Elbe gestattet.



